

(36) 速度依存性を考慮した防舷材の設計手法に関する一考察

A FUNDAMENTAL STUDY ON THE DESIGN METHOD OF FENDER CONSIDERED RATE EFFECT

西本安志*, 池邊将光**, 川上千歳***, 下菌征史****

Yasushi Nishimoto, Masamitsu Ikebe, Chitoshi Kawakami, Masafumi Shimozone

*博士(工学) シバタ工業株式会社 商品企画第2グループ サブリーダー (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058)

**シバタ工業株式会社 海洋土木事業部 海洋設計グループ (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058)

***シバタ工業株式会社 海洋土木事業部 海洋設計グループ リーダー (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058)

****エムエスシーソフトウェア株式会社 コンサルティング事業部 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 1-23-7)

キーワード: 防舷材, 速度依存性, 高速載荷実験

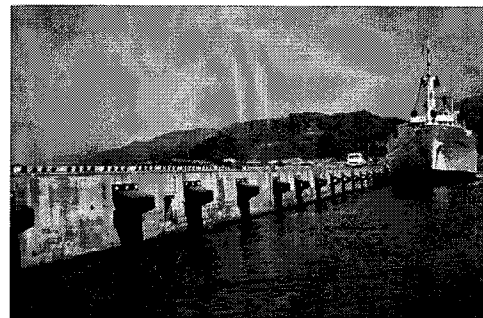
(Fender, Rate effect, High-speed loading test)

1. 緒言

ゴムは、剛性が小さく大変形性能を有するため、衝撃緩衝材として数多く用いられている¹⁾。ここで、衝撃緩衝材として使用される場合の多くは、高速圧縮される際にその効果を発揮する。しかしながら、ゴムは速度依存性を有するため、載荷速度が速くなると剛性が大きくなることなどが知られており^{2), 3)}、静的な挙動だけでは、実現象を確実に評価しているとは言い難い。今後、性能設計へ移行するにあたり、衝撃緩衝材の高速圧縮時の挙動を捉えることは非常に重要であるといえる。

例えば、船舶が岸壁に接岸する際に衝撃緩衝材として用いられる防舷材(写真-1)にも信頼性設計を適用した性能設計法の導入が検討されている。具体的には、現状の防舷材の設計手法は、船舶の船舶質量(排水トン数)や接岸速度が設定され、それらから求まる接岸エネルギーを防舷材の静的圧縮試験で得られた吸収エネルギー量を基に選定されている⁴⁾。しかしながら、船舶が岸壁に接岸する場合の船舶質量(排水トン数)や接岸速度などに確率変動を持たせ接岸エネルギーを評価する^{5), 6)}とともに、防舷材の吸収エネルギー量を接岸速度に応じた速さで圧縮された際の性能を用いて設計評価しようというものである。このため、防舷材の接岸速度に応じた高速圧縮時の性能を評価する手法が必要となる。

よって、本稿では、防舷材の設計手法について現状と信頼性設計法導入時の変更点などについて述べるとともに、防舷材における性能評価に関する課題などについてまとめた。さらに、防舷材の速度依存性について評価実験を行い、その特性と速度依存性を考慮した設計手法における事例について検討した。最後に、防舷材の速度依存性に関する研究の今後について述べた。



(a) V型防舷材



(b) 受衝版付サークル型防舷材

写真-1 防舷材の使用事例

2. 防舷材の信頼性設計法

防舷材は、船舶が岸壁に接岸する際の船舶の接岸エネルギーを吸収し、その際に生じる力を緩和する目的で設置される。そのため、防舷材は、船舶の接岸エネルギーを吸収し、ある一定の反力以下になるように設計される。

通常、接岸エネルギーは、船舶の仮想質量と接岸速度、偏心係数により算定される。現設計法では、最大船舶もしくは標準船型が決まれば一義的にそれらの数値も決定

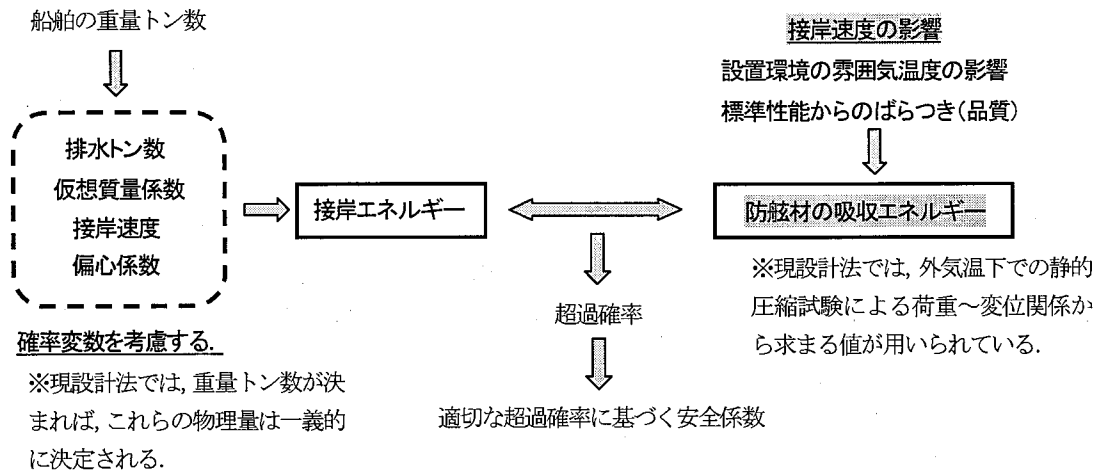


図-1 信頼性設計を導入した防舷材の設計手法

表-1 防舷材の性能評価における載荷速度の考え方

載荷速度の与え方	利点	欠点
CV (Constant Velocity) 方式	<ul style="list-style-type: none"> ・実験が比較的容易である。 ・基準性能に対する係数化が容易である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・実現象を忠実に再現しているとは言い難い。
DV (Decreasing Velocity) 方式	<ul style="list-style-type: none"> ・実現象を再現できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・圧縮速度をどのように減衰させるか不明。 ・基準性能に対する係数化が煩雑である。

され、接岸エネルギーが求められる。その接岸エネルギーに対して、吸収エネルギーがそれを満足するような防舷材を選定するものである。

しかしながら、現実的には、接岸エネルギーを求めるのに用いる物理量は、必ずしも一定ではなく、ばらつきを有している。特に、接岸速度と偏心係数は、天候や操船などのさまざまな接岸条件に影響されるため、想定した値を必ずしも満足しないといえる。また、近年の船舶の大型化により、喫水調整を行ったとしても計画した船型の排水トン数を超える可能性も示唆されている。そのため、接岸エネルギーにばらつきが生じ、防舷材が破壊する可能性もあるといえる。これらのことを考慮して、防舷材の設計にかかわる諸元に関して、統計的性質を考慮した防舷材の信頼性設計が検討されている^{5), 6)}。

一方で、防舷材の吸収エネルギーに関しても、現設計法では、室温下において、圧縮速度が 50mm/min (8.3×10^{-4} mm/sec) で静的圧縮実験された際の荷重～変位関係から求められる値が用いられている。しかしながら、実際に供用される環境を考慮すると、日本国内でも四季の影響で気温変化が著しい上、国内や海外においては防舷材が取り付けられる地域差による温度の影響を大きく受ける。ゴムは、一般的に温度の影響を大きく受けることが知られており、低温側では剛性が向上し、高温側では剛性が低下するという温度依存性を有する⁷⁾。また、実際の接岸速度は 0.1～0.5m/sec であることから、防舷材の性能を評価する 50mm/min (8.3×10^{-4} m/sec) という圧縮

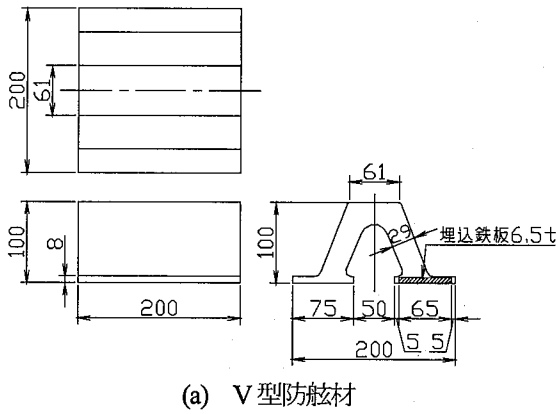
速度では、ゴムが速度依存性を有するため、必ずしも実現象を確実に反映したものとは言い難い。さらには、防舷材の標準性能に対するばらつきをも考慮することが検討されている⁸⁾。よって、これらのことを考慮して、これまで用いてきた防舷材の静的な性能に係数補正をして、防舷材の吸収エネルギーを評価することが検討されている。

すなわち、防舷材の信頼性設計として、図-1に示すように、船舶の諸条件に確率変数を与え、それに基づく接岸エネルギーと温度や速度依存性を考慮した防舷材の吸収エネルギーを比較し、超過確率がある一定値となるような防舷材を選定するというものである。

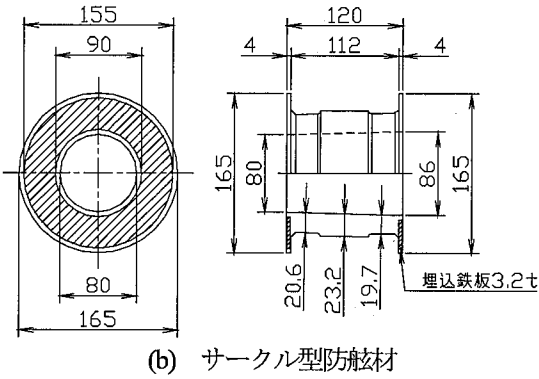
3. 防舷材の速度依存性の考え方

防舷材の速度依存性を考慮するにあたり、ある一定速度で圧縮された際の性能を基準性能として評価することが検討されている。防舷材は、小さいもので高さが 100mm 程度であり、大きいものでは 1200mm に達するものまで存在する。そのため、それらの性能を求めるための圧縮速度が低速であり静的挙動として捉えられる範囲であれば問題ないが、高速度になればなるほど、ひずみ速度という観点からは大きな差が生じるという問題が懸念される。

また、実際の試験方法に着目すると、表-1に示すよ



(a) V型防舷材



(b) サークル型防舷材

図-2 実験供試体

表-2 ゴムの材料諸元

	実験値
引張強度	19.0MPa
破断時の伸び	480%
硬度	65

※JIS規格に基づく材料試験結果

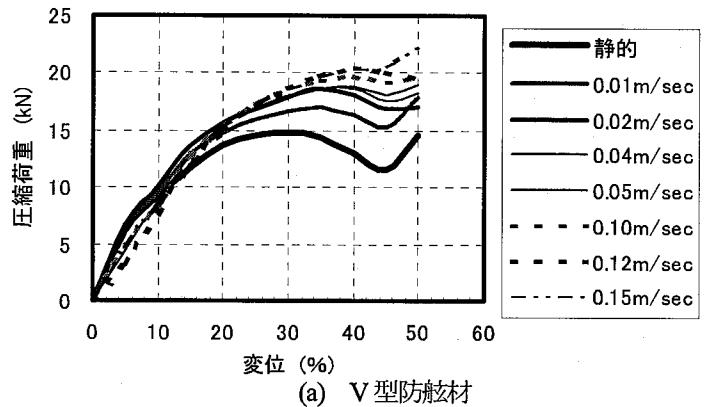
うに、一定速度で圧縮する場合（CV方式）は、試験が比較的容易で、かつ、想定される初速度で圧縮された性能とすれば、基準性能に対する係数化が容易である。しかしながら、実現象は、接岸中には、防舷材の圧縮速度が時々刻々と変化することが想定されるため、確実に実現象を捉えているとは言い難い。一方で、圧縮速度を変化させる場合（DV方式）では、実現象を概ね模擬できるものの、どのように速度を減衰させるのか、どのように基準性能に係数化するかが課題となる。

このように、防舷材の速度依存性を評価する際の载荷速度の考え方に関しては、厳密な決定がなされておらず、未だ協議している段階であるが、近い将来には、速度依存性を考慮した設計手法が導入される。

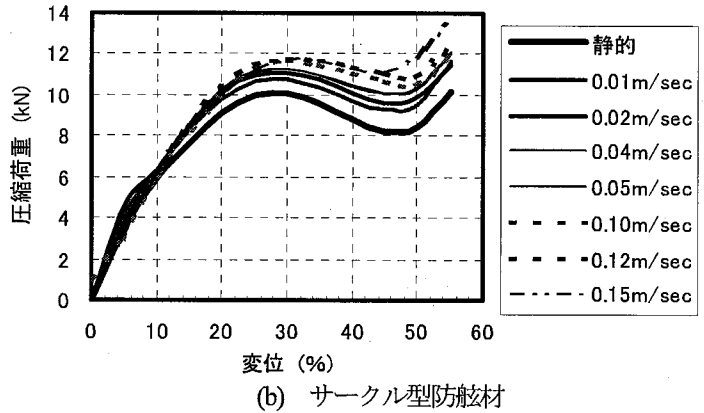
4. 防舷材の速度依存性実験

4.1 実験概要

防舷材の速度依存性実験には、シバタ工業株式会社が



(a) V型防舷材



(b) サークル型防舷材

図-3 载荷速度を変化させた場合の荷重～変位関係

所有する 50kN 型弾性体特性試験機（株三井造船昭島研究所）を使用した。本試験機は、载荷速度が 0～150mm/sec 範囲で実験でき、恒温槽を用いれば 30～100℃の雰囲気温度下で実験できる。本実験は、雰囲気温度 20℃にて、圧縮速度を静的（ 8.3×10^{-4} mm/sec）から、0.01, 0.02, 0.04, 0.05, 0.10, 0.12, 0.15m/sec と一定値に設定した高速载荷実験とした。

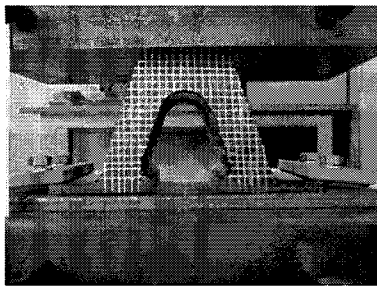
なお、防舷材の圧縮試験の規定⁹⁾に基づき、5分間隔で3回連続して圧縮し、2回目と3回目を平均した荷重～変位関係をその供試体の性能（荷重～変位関係）とした。

4.2 供試体

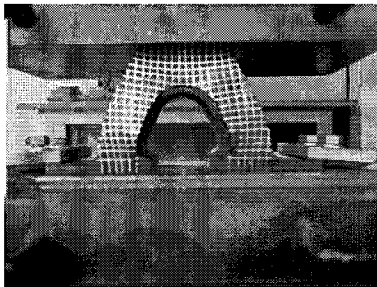
本実験に用いた防舷材は、図-2に示すようにV字形をした高さ100mmのV型防舷材と円筒形状をした高さ120mmのサークル型防舷材の2種類について実施した。V型防舷材供試体は、実用化されている中で一番低い高さのもので、サークル型防舷材供試体は、実用化されているものでは実験できないためミニチュアサイズのものとした。用いたゴムは表-2に示すように硬度65の天然ゴム系とした。

4.2 実験結果と考察

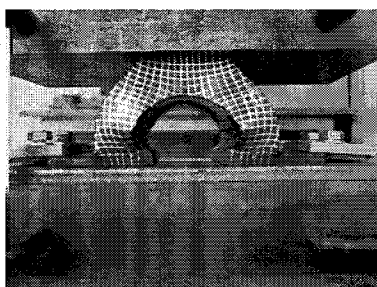
各载荷速度における荷重～変位関係を図-3に示す。また、静的载荷実験における各供試体の変形状況を写真-2および3に示す。



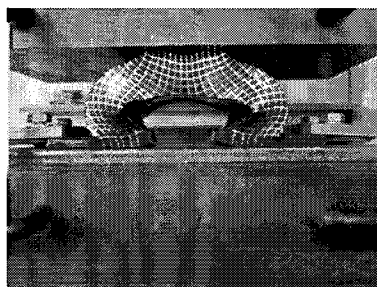
(a) 荷前供試体



(b) 10%変形時



(c) 20%変形時



(d) 30%変形時

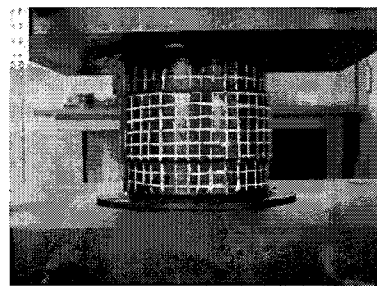


(e) 40%変形時

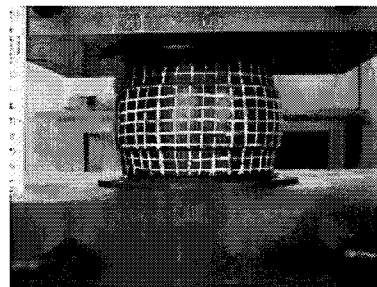


(f) 50%変形時

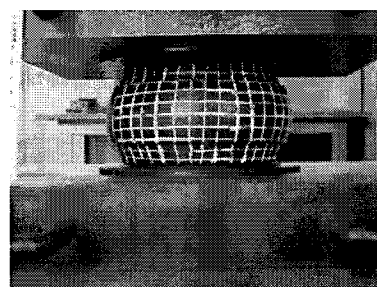
写真-2 V型防舳材の変形状況 (静的載荷)



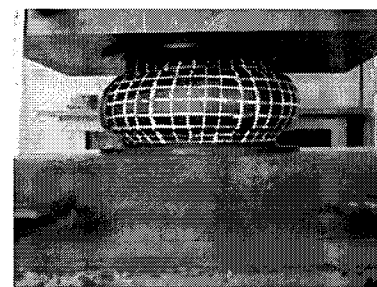
(a) 荷前供試体



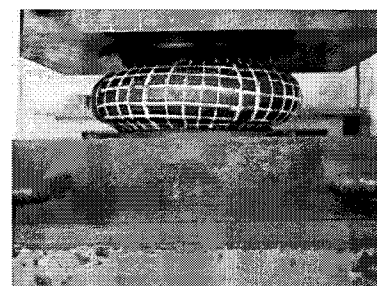
(b) 10%変形時



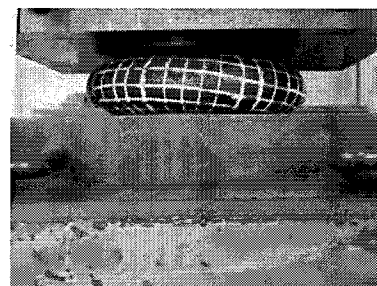
(c) 20%変形時



(d) 30%変形時



(e) 40%変形時



(f) 50%変形時

写真-3 サークル型防舳材の変形状況 (静的載荷)

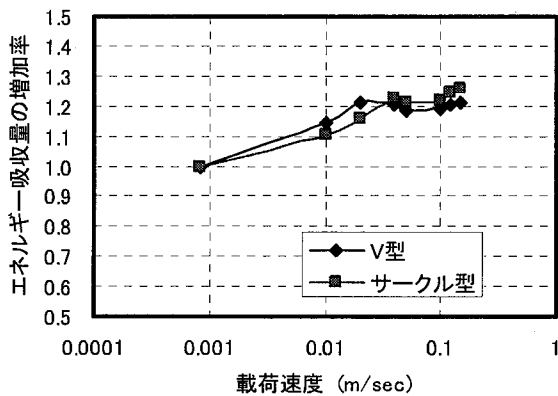


図-4 エネルギー吸収量の増加率
(静的荷重を1.0とした場合の増加率)

図-3より、いずれの形状においても、静的荷重と比較して、荷重速度が増加するにつれ剛性が向上していることがわかる。荷重～変位関係に着目すると、静的荷重と高速荷重の二つに大きく種類分けできる傾向にある。このことは、著者らが過去に実験した矩形状ゴムブロックにおいても同様の傾向を示すことを確認しており、ゴムの特徴のひとつと考えられる³⁾。荷重速度による発生荷重の増加は、圧縮初期の10～15%変形量では高速荷重と静的荷重の差は1.2倍程度と小さいが、圧縮変形が進むと最大約1.5倍程度まで増加することがわかる。また、荷重速度が増加するにつれ、圧縮変位40～50%程度でみられる荷重の低下が無くなる傾向にあることがわかる。

次に、変形状況を示す写真-2より、V型防舷材では、約15%程度までの圧縮初期ではゴムの単なる圧縮作用により変形するが、約20～25%程度でV字型の支え部(足部)で座屈変形が始まり、30%変形以降は天板部まで変形し、50%変形で完全に圧縮されM字型に変形していることがわかる。この座屈変形により、図-3に示すような変形が進行しても荷重がほぼ一定値を示すような定反力域が存在し、このことが防舷材としての大きな特徴のひとつである。特に、荷重～変位関係の20%変形以降の定反力域において、高速荷重時の荷重が静的荷重時より大きく上昇するのは、ゴムの速度依存性による荷重の増加に加え、ゴムどうしの接触による影響が加算されている可能性があると考えられる。同じく、サークル型防舷材の変形状況を示す写真-3より、V型防舷材と同様に、座屈変形が始まる圧縮変位15～20%以降から、静的荷重に比べて高速荷重時の発生荷重が大きく上昇することがわかる。

以上の荷重～変位関係から、各供試体の吸収エネルギー量を求めた。ここで、防舷材の吸収エネルギーとは、ヒステリシスを考慮するのではなく、荷重～変位関係と変位軸で囲まれる面積である。具体的には、V型防舷材の場合は45%変形量まで、サークル型防舷材の場合は52.5%までの吸収エネルギー量である。得られた吸収エ

ネルギー量を静的荷重における吸収エネルギー量を1.0とした場合の増加率として、図-4に示す。図-4より、V型防舷材およびサークル型防舷材の荷重速度によるエネルギー吸収量の増加傾向は、0.15m/secにおいて静的荷重の約1.2～1.25倍程度となり、荷重速度の影響で発生荷重が増加するため、エネルギー吸収量もそれに伴い増加していることがわかる。

以上の結果から、速度依存性を考慮した設計手法の導入において、接岸速度を0.10m/secと設定すると、荷重速度0.10m/secでのエネルギー吸収量は、静的荷重と比較して約1.2倍程度大きな値となる。つまり、単純に速度依存性のみに着目すると、防舷材の高さをその分だけ低く設定できるといえる。しかし、温度依存性や製品のばらつきが考慮され、最終的に、防舷材の大きさが決定されるものといえる。

4. 結言

本研究では、信頼性設計法を導入した防舷材の設計手法について述べるとともに、防舷材における性能評価に関する課題などについてまとめた。さらに、防舷材の速度依存性について実験的に評価した。得られた知見を要約すると以下の通りである。

- 1) 防舷材の速度依存性を確認するため高速荷重実験を行った結果、荷重速度の影響により、同じ変形量でも発生荷重が増加する傾向を示した。
- 2) 特に、圧縮初期と比較して、圧縮変形が進行し、座屈変形が進行するほど、静的荷重と高速荷重における荷重～変位関係の相違が顕著となり、静的荷重と比較して高速荷重における発生荷重の方が大きい値となった。
- 3) それに伴い、荷重速度が大きくなるほど、吸収エネルギー量が増加する傾向を示した。

以上のように、小さい供試体では、速度依存性を実験的に評価することは可能であるが、大型の防舷材に対して実験的な検証を行うことは、事実上困難であるといえる。さらに、防舷材の形状は多種多様であり、今回検討したゴム充実タイプから、ゴム風船のような空気式防舷材までである。そのため、各種の防舷材について実験的検討を行うには、多大な時間とコストが必要となる。よって、種々の形状を有する防舷材や大型の防舷材の性能を評価するためには、ゴムの速度依存性を考慮した数値シミュレーション手法の確立は必要不可欠といえる。

よって、著者らは、ゴムの速度依存性を考慮した数値シミュレーション手法に関する研究を行い、防舷材はもとより衝撃荷重が作用するゴム製緩衝材の性能設計の一助となる手法を確立したいと考える。

参考文献

- 1) 例えば, 日本ゴム協会ゴム技術フォーラム編: ゴム材料の土木・海洋用途をさぐる, ポスティコーポレーション, 1997.01.
- 2) 例えば, 日本免震構造協会: 免震積層ゴム入門, オーム社, 1997.09
- 3) 西本安志, 梶田幸秀, 石川信隆, 西川信二郎: 落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol.46A, pp1865-1874, 2000.03.
- 4) 社団法人日本港湾協会: 港湾施設の技術上の基準・同解説, 1999.
- 5) 上田茂, 平野敏彦, 寺崎誠, 山本修司, 白石悟, 山瀬晴義: 船舶の統計的性質に基づく船舶接舷用防舷材の設計に関する研究, 鳥取大学工学部研究報告, 第32巻, 2001.12.
- 6) 長尾毅, 岡田達彦, 上田茂: FORMに基づく防舷材の信頼性設計法に関する研究, 海洋開発論文集, 第19巻, 2003.07.
- 7) 例えば, 日本ゴム協会: ゴム技術の基礎 第5版, 1993.
- 8) 上田茂, 平野敏彦, 岡田達彦, 山本修司, 白石悟, 山瀬晴義: 統計的手法による船舶接舷用防舷材の設計に関する研究~防舷材の品質が破壊確率に与える影響について~, 土木学会第57会年次学術講演会, pp.115-116, 2002.09.
- 9) PIANC 日本国内委員会: 係船岸の防衝システムの設計, 1980.03.